第 38 卷第 7 期 生 态 学 报 Vol.38,No.7
2018 年 4 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Apr.,2018

DOI:10.5846/stxb201704210726
刘辰明,张志强,陈立欣,邹瑞,张璐,高源,李冬梅.降雨对北方城市 5 种典型城市绿化树种叶面滞尘的影响.生态学报,2018,38(7):2353-2361.
Liu C M, Zhang Z Q,Chen L X, Zou R, Zhang L, Gao Y, Li D M.Impacts of rainfall on leaf PM (airborne particulate matter) detention in five commonly used urban tree species in northern China.Acta Ecologica Sinica,2018,38(7):2353-2361.

# 降雨对北方城市 5 种典型城市绿化树种叶面滞尘的影响

刘辰明,张志强*,陈立欣,邹 瑞,张 璐,高 源,李冬梅
北京林业大学水土保持学院, 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室,北京 100083

**摘要**:城市树木和森林植被净化大气颗粒污染物的功能受到了广泛的重视,但由于受多种植被特征与环境因素的影响,定量评价城市植被净化大气颗粒污染物功能非常困难。研究了不同降雨条件下大叶黄杨、银杏、栾树、五角枫、杜仲 5 种我国北方城市绿化典型树种叶面滞尘量的变化特征。在选定的样树冠层分上、中、下 3 层和东、南、西、北 4 个方向,采集成熟叶片,采用刷洗样本叶表,抽取水样及分级抽滤并烘干称重的方法,测定这 5 种树种降雨后 12d(夏季累积滞尘量)、14mm 降雨后(小雨)、29mm 降雨后(中雨)以及室内模拟降雨 30mm/h(15mm 雨量)后叶片表面不同粒径大气颗粒污染物的滞留量。研究结果表明:降雨对不同粒径颗粒物去除能力有较大差异,除银杏以外,$PM_{>10}$以上颗粒物更容易去除;小雨对颗粒物的冲刷能力有限;中雨可以冲刷掉 50%以上总颗粒物;室内模拟强降雨可以冲刷掉 90%以上颗粒物,随着降雨增大,各粒径颗粒物随之冲刷量增加;同时叶表结构对抗冲刷能力有显著影响,革质叶片更容易滞尘及冲刷,绒毛结构滞尘能力较低,抗冲刷能力较强;北方大叶黄杨具有综合去除空气中颗粒物优势(小雨 TSP 冲刷量为(775.06±33.99) mg/m$^2$),银杏具有去除细颗粒物优势(中雨 $PM_{2.5}$ 冲刷量为(426.55±40.83.99) mg/m$^2$)。

**关键词**:大气颗粒物;$PM_{2.5}$;树种;滞尘;降雨冲刷

# Impacts of rainfall on leaf PM (airborne particulate matter) detention in five commonly used urban tree species in northern China

LIU Chenming, ZHANG Zhiqiang*, CHEN Lixin, ZOU Rui, ZHANG Lu, GAO Yuan, LI Dongmei
*Key Lab. Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*

**Abstract**: It is widely acknowledged that urban trees and forests can significantly improve air quality by removing airborne particulate matter (PM) and thus safeguard the health of urban residents. However, it is very difficult to accurately assess the ability of tree species to capture PMs from the air as such processes are governed by several biotic and abiotic factors. Here, we present a first ever study that explores the effects of rainfall on the detention of PMs by leaves in five commonly used urban greening species in northern China, including *Ginkgo biloba*, *Acer mono Maxim*, *Euonymus japonicus*, *Koelreuteria paniculata*, *and Eucommia ulmoides*. Our specific objectives were to: 1) quantify how much PMs detained on the leaves of five different tree species can be washed off by natural and simulated rainfall events, 2) compare the difference in PM removal between tree species under different amounts of rainfall, and 3) analyze the factors that might contribute to the differences in PM removal under different rainfall conditions. Leaves were uniformly collected from top, middle, and bottom layers of the tree canopy at four cardinal directions from the sampling trees after several minutes of rainfall and

**基金项目**:国家林业公益性行业科研专项(20130430103);北京市教育委员会科学研究与研究生培养共建项目
**收稿日期**:2017-04-21; **网络出版日期**:2018-01-04

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhqzhang@ bjfu.edu.cn

12 days after rainfall. Each sampled tree leaf was sealed in a plastic bag immediately after collection. To measure the quantity of PMs trapped on leaves, the samples were washed and water used for washing was collected. Thereafter, 10% of the water was dried to determine the weight of total suspended particulates (TSP), while the remaining 90% of the water was passed through a 10μm mesh filter and then through a 2.5μm mesh filter. These filters were then dried to determine the weight of PM > 10μm ($PM_{>10}$) and PMs that were between 2.5 and 10μm ($PM_{10-2.5}$). Then, 20% of the filtered water was dried to determine the weight of PMs that were<2.5μm ($PM_{2.5}$). Once the quantity of airborne particulate matter held per unit leaf area was determined for each of the study species, leaves were sampled after exposure to the following rainfall conditions: light rain (14mm), moderate rain (29mm), 30mm/h indoor simulated rain (equal to 15mm), and 12 days after rain (to determine the saturated dust held in summer). The result indicated that the amount of PM washed off from the leaves by rainfall varied greatly with the size of the particulates and the rainfall condition (including the intensity and amount of precipitation). For all species except *Ginkgo biloba*, $PM_{10}$ could be washed off even under light natural rainfall condition and the amount and intensity of rainfall were critical factors in controlling PM removal. Overall, 50% and 90% of the TSP were removed by moderate rainfall and simulated torrential rainfall, respectively, due to higher intensity of rainfall. One major factor that contributes to the above observations is the surface structure of leaves: smooth surfaces, like leathery leaves, have better ability to trap PMs, which also wash-off more easily. Among the five species, *Euonymus japonicus* recorded the best overall absorption of particulates (washed TSP: (775.06±33.99) mg/$m^2$, light rain), while *Ginkgo biloba* had an edge on absorbing particulates of small sizes (washed $PM_{2.5}$: (426.55±40.83.99) mg/$m^2$, moderate rain). We concluded that the species differed in their ability to trap airborne PMs and in the rate of removal of PM from the leaves by a rainfall event, and this was influenced by the differences in the surface structure of leaves of the species, rainfall amount and intensity, as well as the particulate size.

**Key Words**: atmospheric particulates; $PM_{2.5}$; tree species; foliar dust retention; rainfall effected dust removal

随着快速城市化及工业化的发展,近些年我国城市空气质量问题日益突出[1]。研究表明,大气细颗粒($PM_{2.5}$,Fine Particulate Matter)污染显著增加了公众患病概率,成为危害城市居民健康的最大风险因素之一[2]。据估计,2013 年我国京津冀地区大气 $PM_{2.5}$污染导致的经济损失和居民健康危害损失总量达到 1342.9(1068.5—1598.2)亿元,占该地区当年国民经济总产值的 2.16%(1.72%—2.58%)[3]。国内外研究表明,植物对大气环境中的细颗粒物滞留明显[4-6],可以有效地去除空气中的细颗粒物,从而改善大气环境,对人体健康及经济效益有显著影响[7-10],据研究,美国城市树木每年可以去除 71100 吨大气中的颗粒物,带来经济效益高达 38 亿美元[7]。通过检测叶片表面滞尘状况,可以快速了解区域环境空气质量水平[11]。

树木滞尘能力受多种因素的影响,其中既包括生活型、个体大小、叶片表面形态、枝叶密度、树冠结构等植物形态特征[11-16],也包括大气环境条件如污染物浓度、化学组成、天气状况(如风、温度、湿度、光照)等非生物学因素[17-20],同时植物挥发性物质释放或液体分泌物释放等生物化学过程也可能影响植被对大气颗粒污染物吸附与滞留功能[11,21]。植物叶片表面具有一定的粗糙度及湿润度,可以吸附一部分大气颗粒物至其表面[22];此外,植物也可以通过分泌物吸附并固定颗粒物至叶片和枝干,随着树木的生长发育,可持续捕获大气中的细颗粒物[11]。不同植物滞尘能力有差异,陈立欣等人[23]研究表明,针叶树(>20μg/$cm^2$)更具有滞尘优势。王赞红等人[24]研究表明,晴朗微风条件下,15 日后大叶黄杨达到单叶最大饱和滞尘量为 11.6197g/$m^2$,王会霞等人[17]研究表明,不同种类植物叶面滞尘量差异较大,同样天气条件下,油松叶面滞尘变化量范围为 4.57—5.45g/$m^2$,而三叶草仅为 0.12—0.38g/$m^2$。

在影响树木滞尘的众多气象因素中,降水可有效去除植物表面颗粒物(PM,Particulate Matter),进而为植物表面再滞留和吸附大气颗粒物提供容纳空间。研究表明,不同降雨量对颗粒物去除效果不同[19],且因树种而异。王会霞等人[17]研究表明,小于 12mm 降水不能有效去除叶面滞留颗粒物,而当降水量达到 31.9mm,可

去除女贞和珊瑚树表面滞尘的 50%和 62%。Przybysz 等人[18]模拟实验表明,20mm 降雨可以洗去欧洲赤松表面累积大气颗粒物的 30%—41%。柴一新等人[12]认为,降水量达到 15mm 就可以洗掉植物叶片降尘从而重新滞尘[25]。从较长时间尺度上看,不同降水量、降水强度以及降水持续时间对树木叶片累积颗粒物动态变化会产生重要的影响,然而,受取样时间选择、叶片滞尘量测定、前期大气颗粒物污染程度等的综合影响,开展降水对树木叶片滞留大气颗粒污染物影响的研究相当困难,相关研究较少。因此,本研究选择北方城市典型的 5 种绿化树种,定量研究不同降水事件洗刷叶片滞尘量,比较不同降水条件和不同树种之间的差异,分析造成这些差异的主要原因,以期筛选出反复滞尘能力较强的树种,为旨在改善大气质量的城市林业建设提供理论指导和数据支撑。

## 1　研究区概况

本研究天然降水实验取样地位于北京市海淀区的北京林业大学校园内(中心位于 40.0°N,116.3°E),人工模拟降水实验取样地为位于北京西山的首都圈森林生态系统定位研究站人工降雨大厅周边。北京市气候为典型的温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,春季多风和沙尘,夏季炎热多雨,秋季晴朗干燥,冬季寒冷且大风猛烈,春秋较短,夏冬时间较长,全年降水的 80%集中在夏季 6、7、8 三个月[26]。2014 年 7 月 $PM_{10}$均值为 96.56μg/m$^3$,最小值为 42.62μg/m$^3$,最大值为 194.25μg/m$^3$,$PM_{2.5}$均值为 91.874μg/m$^3$,最小值为 12.78μg/m$^3$,最大值为 199.83μg/m$^3$[27]。

## 2　研究方法

选取银杏(*Ginkgo biloba*)、五角枫(*Acer mono* Maxim)、大叶黄杨(*Euonymus japonicus*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)5 种北方常用典型城市绿化树种为对象,其基本特征见表 1。

**表 1　实验树种基本特征**

**Table 1　Basic features for different plants**

| 树种 Plant species | 科 Family | 生活型 Life form | 叶片特征 Leaf characteristics | 单叶单面面积 Single leaf area/cm$^2$ | 树高 Tree height | 采样地点 Sampling sites |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 杜仲 *Eucommia ulmoides* | 杜仲科 | 落叶乔木 | 薄革质 | 86.88±6.06a | 8.4±0.55a | 环岛南 |
| 大叶黄杨 *Euonymus japonicus* | 卫矛科 | 常绿灌木 | 革质 | 10.19±2.4b | 1.45±0.10b | 环岛东 |
| 栾树 *Koelreuteria paniculata* | 无患子科 | 落叶乔木 | 背面沿脉有短绒毛 | 20.14±5.4c | 13.83±1.85c | 环岛西南 |
| 五角枫 *Acer mono* Maxim | 槭树科 | 落叶小乔木 | 薄纸质或纸质 | 38.43±6.26d | 7.5±1.10a | 环岛东北 |
| 银杏 *Ginkgo biloba* | 银杏科 | 落叶乔木 | 多数细脉 | 19.38±2.28c | 8.2±1.05a | 环岛北 |

不同小写字母表示差异显著

### 2.1　样品采集方法

天然降水冲刷植物表面颗粒物吸附取样采集日期为 2014 年 7 月 14 日、19 日及 31 日,位于北京林业大学校园内。将每棵样树树冠分为上、中、下 3 层,每层按照东、南、西、北 4 个方向从内到外用枝剪整枝均匀采集成熟叶片,采样后迅速装至自封袋中,同时标注采样地点、树高、枝条生长状况等。每种树木采集 3 组平行样本,带回实验室备用。

7 月 14 日采样前超过 10 天没有降雨,故将此次采样获得的叶片表面颗粒物滞留量作为夏季植物表面颗粒物的累积滞留量;7 月 19 日采样前有雷雨、阵雨,7 月 15、16、19 日累积降雨量 14mm,将此次取样测定的叶片滞尘量定义为小雨后滞尘量;7 月 31 日采样前有中雨,7 月 29、30 日累积降雨量达到 29mm,此次测得的数据定义为中雨后滞尘量[28]。2014 年 7 月北京市空气质量状况见图 1[27,29]。

用于室内人工模拟降雨供试植物材料均为降雨后超过 10d 野外采集,每种树种随机选择靠近路边(污染源)方向同一高度大小相近的 3 个枝条,分别置于相同的 3 个塑料箱中,塑料箱规格为 1m×1m×1m,并设置相同规格的空白实验箱同时进行人工模拟降雨实验。实验雨强为恒定强度 30mm/h,降雨历时为 30min,每个实

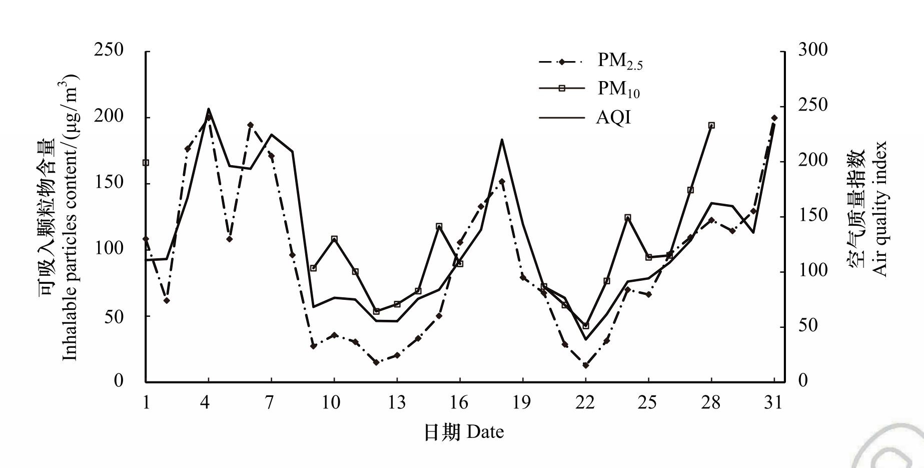



**图 1 北京市 2014 年 7 月 AQI、$PM_{10}$、$PM_{2.5}$ 含量[27,29]**

**Fig.1 AQI/$PM_{10}$/$PM_{2.5}$ content, Beijing, July 2014[27,29]**



验箱中共计降雨 15000mL。降雨完成后,摇匀箱体中冲刷植物的液体,并抽取 300mL 左右装入塑料盒中备用。枝条取出记录总重,剪取部分叶片备用并记录剪取叶片重量。

### 2.2 单位叶面积滞尘量测量方法

滞尘量采用重量法测得[10,23]。剪取植株叶片样品(不含叶柄)称重并编号(样品重 5g 左右),每个树种设置 3 个重复。用软毛刷在蒸馏水中刷洗叶片正反面,收集洗液,重复 3 次洗涤再冲洗洗涤工具 3 次,收集全部洗液待用。洗净的全部样品叶片贴于塑料板上,通过扫描用 Photoshop 计算叶面积。

实验前对所用微孔滤膜进行预处理,去除可溶物质,以保证实验精度[30]。预处理方法为:实验中使用的微孔滤膜,均用蒸馏水充分浸泡 24h,再经真空抽滤泵抽洗后放入烘箱于 105℃下烘干至恒重,用十万分之一天平称重待用;耐高温 pp 塑料袋(5cm×7cm)称重待用。

用千分之一天平按质量百分比抽取 10%洗液置于 pp 塑料袋中,放入烘箱于 105℃烘干 24h 至恒重,经换算可以获得总颗粒物(TSP,Total Suspended Particulates)重量。剩余 90%滤液使用真空抽滤装置,过 10μm 微孔滤膜,滤液再过 2.5μm 微孔滤膜,抽滤完成后 10、2.5μm 微孔滤膜于 105℃温度下烘干称重,换算可得直径 10μm 以上颗粒物重量($PM_{>10}$以上),直径 10—2.5μm 之间颗粒物重量($PM_{10—2.5}$)。抽取经过两次抽滤滤液的 20%于 pp 塑料袋中,连袋烘干称重,换算可获得粒径 2.5μm 以下颗粒物重量($PM_{2.5}$)。

室内降雨实验抽取部分溶液通过同样方法求得抽取溶液内各粒径颗粒物含量,根据抽取溶液与降雨量比例换算,减去空白,求出 5 种植物叶片全部冲刷滞尘量。结合叶面积得出 5 种植物单位叶面积降雨冲刷量。降雨之后剪取备用部分叶片,同上方法刷洗测量残余滞尘量。

不同粒径颗粒物质量理论上应该符合公式:

$$TSP = PM_{10} + (PM_{>10—2.5}) + PM_{2.5} \tag{1}$$

可采用式 1 计算得到的 TSP 值与实测值 TSP 进行比较验证其测定精度。本次实验中通过两种方法测得 TSP 数据相对误差均值为 4.537%。将无前期降水条件测得的叶片滞尘量作为累积滞尘量(Ds),在本文中,为了衡量降雨对冲刷滞尘效果的影响,我们计算了每个树种对应降水的冲刷率[17-18]:

冲刷率=(累积滞尘量-降水后滞尘量)/累积滞尘量

雨后取样测定的叶片滞尘量记为 Dr,则降水冲刷量 W 和冲刷率 Rw 可由以下公式计算:

即
$$W = Ds - Dr, Rw = (Ds - Dr)/Ds \tag{2}$$

冲刷率反映了降水洗去的滞尘量所占的比率,较高的冲刷率意味着降水带走了更多的颗粒物。

### 2.3 统计分析

用 SPSS 19.0 软件进行数据分析,用单因素方差分析法(ANOVA)分析各采样点不同树种、不同时间单位

叶面积滞尘量的差异。用同样方法分析室内模拟降雨冲刷滞尘量种间差异,差异显著水平设为 0.05。

## 3　结果与分析

### 3.1　不同树种累积滞尘量的比较

在相同天气条件下,5 种植物单位叶面积不同粒径大气颗粒污染物 TSP、$PM_{>10}$、$PM_{>10-2.5}$、$PM_{2.5}$滞留量存在差异,部分树种之间差异极显著,$PM_{>10}$及 $PM_{2.5}$占叶片滞留颗粒物的主体部分,$PM_{>10-2.5}$仅占叶片颗粒物滞留总量的 5%以下(图 2)。

从单位叶面积总颗粒物(TSP)累积滞留量看,按照大叶黄杨、杜仲、五角枫、银杏和栾树的顺序递减,其中,大叶黄杨 TSP 滞留量(1959.38±83.57)mg/m$^2$显著高于五角枫、银杏和栾树($P<0.05$),但与杜仲无显著差异;杜仲、五角枫无显著差异,但均显著高于栾树($P<0.05$),银杏显著低于大叶黄杨,且与其他 3 种植物无显著差异($P>0.05$);大叶黄杨、杜仲、五角枫 $PM_{>10}$粒径滞尘量无显著差异($P>0.05$),但均显著高于栾树与银杏,银杏与栾树之间也有显著差异($P>0.05$);大叶黄杨和银杏 $PM_{2.5}$滞留量没有显著差异($P>0.05$),但二者均显著高于栾树、杜仲、五角枫,而后三者之间无显著差异($P>0.05$)。

从单位叶面积小雨残留滞尘量看,杜仲 TSP 粒级残留量(1549.7±101.39)mg/m$^2$显著高于大叶黄杨、五角枫、栾树、银杏($P<0.05$),后 4 种植物之间差异不显著;杜仲 $PM_{>10}$粒径残留量(744.42±126.96)mg/m$^2$显著高于银杏(552.45±33.2)mg/m$^2$,但与大叶黄杨、五角枫、栾树差异不显著($P>0.05$);杜仲 $PM_{2.5}$残留量(676.55±76.42)mg/m$^2$显著大于其余 4 种植物($P<0.05$),银杏显著大于五角枫和栾树,但与大叶黄杨无显著差异($P>0.05$),大叶黄杨显著大于五角枫,但与栾树差异不显著,栾树与五角枫差异不显著($P>0.05$)。

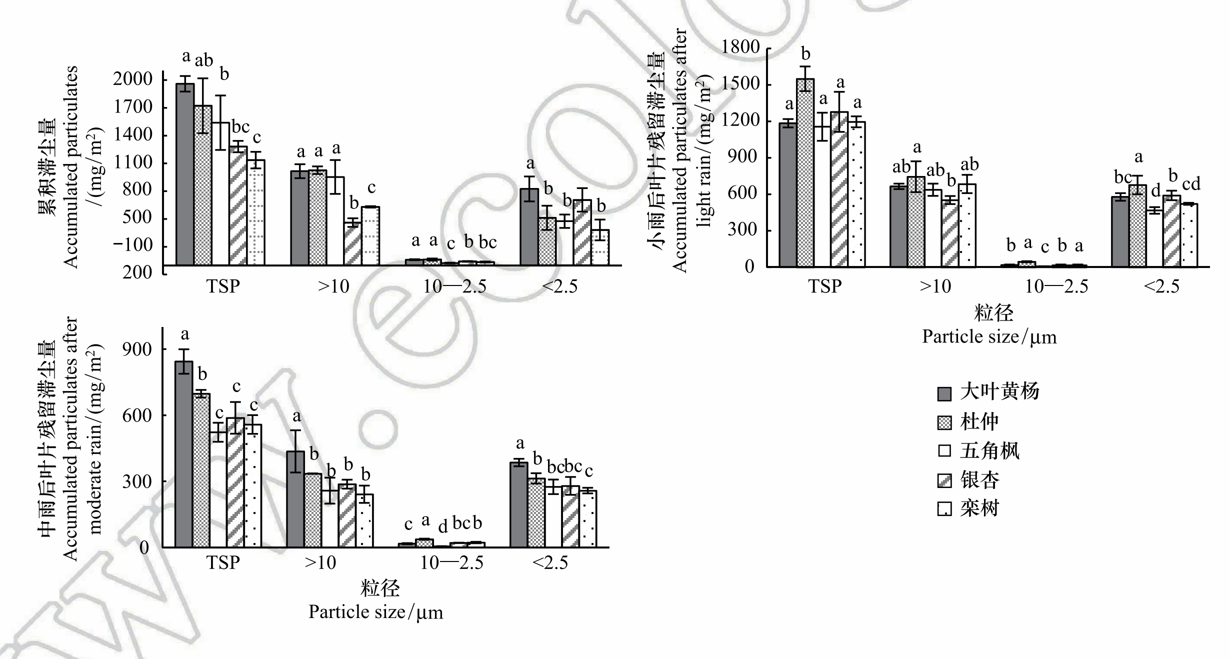



**图 2　不同降雨条件下 5 种植物叶片单位面积大气颗粒物滞留量**

**Fig.2　Amount of particulates accumulated particulates under different rain condition on unit leaf surface area for 5 trees**

TSP,总颗粒物 total suspended particulates. 图中数据为均值±标准差($n=3$),不同小写字母表示结果在 0.05 水平上差异显著

从单位叶面积中雨残留滞尘量看,其中大叶黄杨中雨残余滞尘量,除 $PM_{>10-2.5}$粒级以外,其他粒级均显著大于其他 4 种树种($P<0.05$)。五角枫、银杏、栾树中雨残余滞尘量,除 $PM_{>10-2.5}$粒级,其他粒径差异均不显著($P>0.05$)。杜仲 TSP 粒级残留量显著大于五角枫、银杏、栾树($P<0.05$),后三者之间无显著差异($P>0.05$);$PM_{10}$粒级残留量杜仲、五角枫、银杏、栾树无显著差异($P>0.05$);杜仲 $PM_{2.5}$粒级残留量显著大于栾树($P<0.05$),与五角枫、银杏无显著差异,五角枫、银杏、栾树之间无显著差异($P>0.05$)。

**3.2** 降水对不同粒径大气颗粒污染物冲刷量的树种差异

在相同降水条件下,5 种树种单位叶面积各粒径大气颗粒物 PMTSP、$PM_{>10}$、$PM_{>10—2.5}$、$PM_{2.5}$ 冲刷存在差异,部分树种之间差异极显著(图 3)。同滞尘量一致,冲刷量主体依然为 $PM_{>10}$ 及 $PM_{2.5}$。

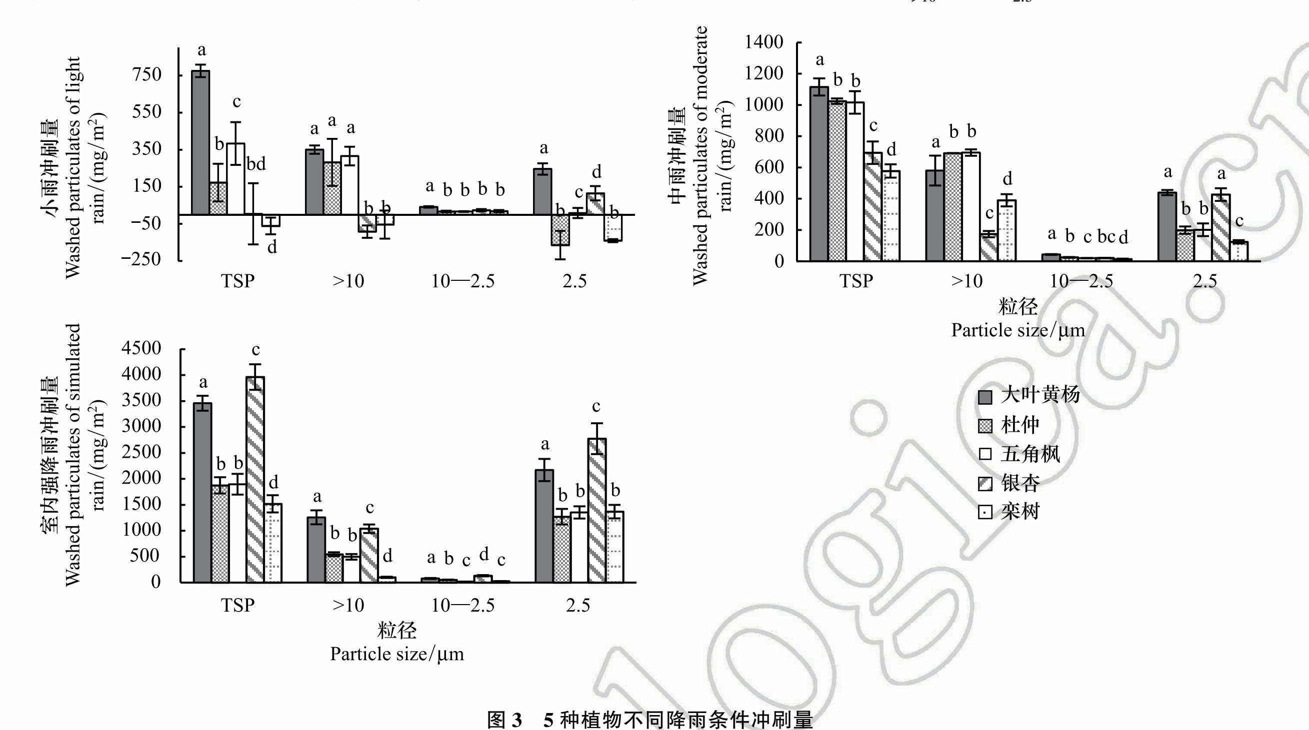



**图 3 5 种植物不同降雨条件冲刷量**

**Fig.3 Amount of particulates washed particulates under different rain condition on unit leaf surface area for 5 trees**

TSP,总颗粒物 total suspended particulates. 图中数据为均值±标准差($n=3$),不同小写字母表示结果在 0.05 水平上差异显著

从单位叶面积小雨冲刷量来看大叶黄杨 TSP 粒级(775.06±33.99) mg/m² 显著高于五角枫(383.48±115.61) mg/m²、杜仲、银杏、栾树($P<0.05$),五角枫显著高于杜仲、银杏、栾树,杜仲显著高于栾树($P<0.05$),但与银杏无显著差异($P>0.05$),银杏与栾树无显著差异($P>0.05$);大叶黄杨、杜仲、五角枫 $PM_{>10}$ 粒径无显著差异($P>0.05$),但均显著高于银杏与栾树($P<0.05$),银杏与栾树间无显著差异($P>0.05$);大叶黄杨小雨冲刷量 $PM_{2.5}$ 粒级(246.24±31.06) mg/m² 显著大于其余 4 种植物($P<0.05$),银杏(115.16±38.65) mg/m² 显著大于杜仲、五角枫、栾树($P<0.05$),五角枫显著大于栾树、杜仲($P<0.05$),杜仲与栾树之间无显著差异($P>0.05$)。

从单位叶面积中雨冲刷量来看,大叶黄杨 TSP 粒级显著高于其余 4 种植物($P<0.05$),杜仲、五角枫无显著差异($P>0.05$),但均显著高于银杏、栾树($P<0.05$),银杏显著高于栾树($P<0.05$);五角枫、杜仲 $PM_{>10}$ 粒级滞尘量无显著差异($P>0.05$),但均显著高于大叶黄杨、银杏、栾树($P<0.05$),大叶黄杨显著高于银杏、栾树($P<0.05$),银杏显著小于其他各树种($P<0.05$);$PM_{10—2.5}$ 粒级各植物小雨与中雨冲刷量差异不显著;大叶黄杨 $PM_{2.5}$ 粒级与银杏差异不显著($P>0.05$),但均显著高于杜仲、五角枫、栾树($P<0.05$),杜仲与五角枫差异不显著($P>0.05$),但均显著高于栾树($P<0.05$)。

从室内模拟降雨 5 种植物单位面积冲刷量来看,TSP 粒级按照银杏、大叶黄杨、五角枫、杜仲和栾树的顺序递减,银杏显著高于其他 4 种植物($P<0.05$),大叶黄杨显著高于五角枫、杜仲、栾树($P<0.05$),五角枫、杜仲之间没有显著差异($P>0.05$),栾树显著小于其他 4 种植物($P<0.05$);大叶黄杨 $PM_{>10}$ 粒级显著高于其他 4 种植物($P<0.05$),银杏显著高于杜仲、五角枫、栾树($P<0.05$),杜仲与五角枫差异不显著,但均显著高于栾树($P<0.05$);$PM_{10—2.5}$ 单位面积冲刷量为银杏显著高于其他 4 种植物;银杏 $PM_{2.5}$ 粒级冲刷量显著大于其余 4 种植物($P<0.05$),大叶黄杨显著大于栾树、五角枫、杜仲($P<0.05$),其余 3 种植物差异不显著($P>0.05$)。

**3.3** 不同降雨条件对树种相同粒径冲刷率的影响

表 2 为不同降雨条件下 5 个树种滞尘量的冲刷率,即冲刷量/总滞尘量。中雨对 5 种植物均有冲刷效果,

5 种植物 TSP 冲刷率为 50.86%—66.03%,比较接近;当树种 $PM_{>10}$ 冲刷率较大时,其 $PM_{2.5}$ 冲刷率较小。对比天然降雨冲刷率,室内降雨各个粒径冲刷率削减显著增加。30mm 雨强室内降雨对 5 种植物冲刷效果显著,除栾树 $PM_{10}$ 粒级(65.74%)、五角枫 $PM_{>10-2.5}$ 粒级(88.57%),其他树种不同粒径冲刷率,均不小于 91.35%。

表 2　不同降雨条件下 5 个树种滞尘量冲刷率/%

Table 2　Ratio of washed particulates over total amount of particulates

| 树种 Plant species | 小雨 Light rain | | | |
|---|---|---|---|---|
| | TSP | $PM_{>10}$ | $PM_{10-2.5}$ | $PM_{2.5}$ |
| 大叶黄杨 *Euonymus japonicus* | 39.55±1.73a | 34.49±2.22a | 69.32±6.53a | 29.86±3.76a |
| 杜仲 *Eucommia ulmoides* | 10.02±5.88b | 27.46±12.37a | 27.22±7.41b | -32.12±14.92b |
| 五角枫 *Acer mono* Maxim | 24.91±7.51c | 33.14±5.23a | 70.56±8.98a | 1.76±5.73c |
| 银杏 *Ginkgo biloba* | 0.32±12.87bd | -19.88b±7.2 | 57.8±14.05a | 16.31±5.47d |
| 栾树 *Koelreuteria paniculata* | -5.34±3.97d | -8.47±11.98b | 52.35±17.29a | -36.72±2.12b |
| 树种 Plant species | 中雨 Moderate rain | | | |
| | TSP | $PM_{>10}$ | $PM_{10-2.5}$ | $PM_{2.5}$ |
| 大叶黄杨 *Euonymus japonicus* | 56.93±2.83ab | 57.09±9.43a | 71.45±4.37a | 53.26±1.98a |
| 杜仲 *Eucommia ulmoides* | 59.5±1.01a | 67.35±0.1ab | 39.83±4.15bc | 38.77±4.59bd |
| 五角枫 *Acer mono* Maxim | 66.03±2.79c | 72.97±6.15b | 81.33±7.13a | 42.2±5.62b |
| 银杏 *Ginkgo biloba* | 54.15±5.59ab | 37.66±4.42c | 49.58±2.2b | 60.43±5.78c |
| 栾树 *Koelreuteria paniculata* | 50.86±3.72b | 61.73±6.2a | 37.06±9.2c | 32.43±2.77d |
| 树种 Plant species | 模拟降雨 Simulated rain | | | |
| | TSP | $PM_{>10}$ | $PM_{10-2.5}$ | $PM_{2.5}$ |
| 大叶黄杨 *Euonymus japonicus* | 96.39±3.99a | 94.04±10.01a | 95.01±10.76a | 97.97±9.69a |
| 杜仲 *Eucommia ulmoides* | 96.76±8.1a | 93.13±6.5a | 97.68±11.09a | 98.35±11.58a |
| 五角枫 *Acer mono* Maxim | 96.96±10.2a | 94.47±10.33a | 88.55±7.48a | 97.98±8.43a |
| 银杏 *Ginkgo biloba* | 98.96±6.14a | 98.16±7.87a | 98.69a±9.35 | 99.3±10.66a |
| 栾树 *Koelreuteria paniculata* | 93.93±10.27d | 65.74±7.79b | 91.34±9.91a | 97.2±9.3b |

TSP,总颗粒物 total suspended particulates. PM,颗粒物 particulate matter. 表中数据为均值±标准差($n$=3),不同小写字母表示结果在 0.05 水平上差异显著

小雨对植物 $PM_{>10-2.5}$ 有去除效果,各植物小雨与中雨冲刷率差异不显著为 37.06%—81.34%,雨强增至 30mm/h,大叶黄杨、杜仲、银杏冲刷率显著增多,五角枫、栾树没有显著变化。

天然降雨中,除银杏外,$PM_{>10}$ 冲刷率(34.49%—27.46%、72.97%—57.09%)均大于 $PM_{2.5}$ 冲刷率(29.86%—1.76%、53.26%—32.43%)。随着雨量增大,冲刷掉的颗粒物中 $PM_{2.5}$ 的比例上升,但 $PM_{>10}$ 冲刷量始终高于 $PM_{2.5}$,银杏反之。室内模拟降雨中,5 种植物 $PM_{2.5}$(99.3%—97.21%)冲刷率均大于 $PM_{>10}$(98.16%—65.74%),这可能是强降雨破坏了 $PM_{>10}$ 颗粒物,使之分解成更小的颗粒物。5 种植物 TSP 滞留能力杜仲相对较强,栾树较弱,大叶黄杨的 TSP 滞留量更容易受到降雨影响。$PM_{>10}$ 颗粒物大叶黄杨滞留能力较强,银杏较弱,$PM_{>10-2.5}$ 粒径颗粒物各树种差异不显著,大叶黄杨滞留能力相对较强,$PM_{2.5}$ 颗粒物的栾树及大叶黄杨滞留能力较强。

除了银杏之外,其余 4 种树木随着降雨,残余在叶表 $PM_{>10}$ 颗粒物所占比重降低,$PM_{2.5}$ 颗粒物所占比重升高,说明降水对大颗粒物的去除更有效率。其中大叶黄杨变化幅度最小,说明降雨对大叶黄杨不同粒级的颗粒物影响更为均等。银杏的 3 种粒级颗粒物滞尘百分比变化规律随着降雨和其他 4 种植物正好相反,残余在叶表 $PM_{2.5}$ 颗粒物比重降低,$PM_{>10}$ 颗粒物比重升高,说明降水对银杏细颗粒物的去除更有效率。

## 4　讨论

### 4.1　树种间叶表吸附大气颗粒物的差异

树种间叶表吸附大气颗粒物的能力差异是由叶表结构特征等决定的,树种对大气颗粒物滞留作用主要是

集中在 $PM_{>10}$ 和 $PM_{2.5}$ 颗粒，$PM_{2.5}$ 占总滞尘量 50%左右(图 2)，这和贾彦等[25]用扫描电镜观测杜鹃花、紫叶李等 7 种植物的结果基本一致。不同类型叶片表面植物滞尘能力差异较大[13,21]，大叶黄杨在累积滞尘条件及中雨之后，各个粒径级别滞留能力均比较强(图 2)，这与杨佳等[31]研究相一致，同为革质叶片的杜仲在滞留除 $PM_{2.5}$ 之外其他粒径的污染物也较高(图 2)，显然光滑的革质叶片有利用颗粒物的滞留。栾树叶表生有绒毛，王会霞等人[32]的研究中绒毛类型结构对滞尘量影响较大，整体各个粒径尺度滞留量在雨前雨后相对较小，但是在人工降雨之后，$PM_{>10}$ 残余颗粒物的滞留量却处于前列，绒毛结构可能不容易附着颗粒物，同时不容易洗脱，这与贾彦等[25]文章中提到的有毛的红栓木、紫叶李滞尘能力较低一致。房瑶瑶等人[33]研究表明，具有规则形态蜡质层无叶毛叶表(如银杏)洗脱率更高和本研究一致。不同植物雨后滞留量差异小于典型天气后日常时植物的滞尘量，这可能与不同植物饱和滞尘能力上限差异有关。

### 4.2　降雨对去除植物叶表不同粒径能力的差异

14mm 天然降雨条件下，大叶黄杨颗粒物冲刷率最多，TSP 接近 40%，$PM_{2.5}$ 较少也接近 30%，银杏 $PM_{2.5}$ 冲刷率有 16.32%；栾树、杜仲 $PM_{2.5}$ 粒径颗粒物不仅没有冲掉，反而增长了 30%以上(图 3，表 2)。29mm 天然降雨条件下，各树种 TSP 冲刷率均在 50%以上，大叶黄杨、杜仲、五角枫，在大颗粒物去除上显著高于其他两种植物；除银杏外，降雨更容易去除 $PM_{>10}$ 颗粒物(图 3，表 2)，这可能和银杏叶表条状结构有关。陈立欣等人[23]研究表明，表面特征蜡层、毛状物等突起可使水滴与不同叶表的接触角不同，这些因素形成了不同的防水性能。查燕等[19]提到降雨对粗颗粒的影响更大，不同的降雨对不同的植物去除能力也不同，Przybysz 等[18]研究同样提到，降雨对樟子松粗颗粒物影响较大，不同树种之间受降雨影响也有差异，和本研究是一致的。本研究表明叶片表面的形态结构对颗粒物的饱和滞尘量及颗粒物洗脱难易程度具有不同程度的影响，叶表光滑更易洗脱颗粒物，大颗粒物更容易去除。

### 4.3　不同降雨条件对树种滞尘冲刷能力的影响差异

不少研究[12,25]中认为 15mm 降雨可以去除掉植物表面颗粒物从而再次滞尘，本实验中，14mm 降雨对部分树种叶表面颗粒物去除能力有限，盛后财等人[34]的研究中显示，红松林树干径流各元素浓度>穿透雨>大气降雨，于小军等人[35]研究，相对于林外雨，养分均出现富集化，树干茎流养分富集化高于穿透雨，说明穿透雨可能将树冠顶端颗粒物汇集至下端叶片表面，对颗粒物去除效果不显著；29mm 降雨可以冲刷掉 50%以上总颗粒物，王会霞等人[17]研究中，12mm 以下的降水不能有效去除叶面上滞留的颗粒物，31.9mm 降水后，油松和三叶草叶面滞尘量变化不明显，而女贞和珊瑚树叶面上约 50%和 62%的颗粒物被洗除。室内模拟降雨条件下，各树种各粒径冲刷率达到 90%以上，细颗粒物冲刷量均大于粗颗粒物(图 3，表 2)，这与其他人研究[19]的室外实验结论相反，初步推测强降雨破坏粗颗粒物结构，转换成细颗粒物。本研究表明不同降水条件对植物滞尘冲刷能力存在差异，与叶表结构、颗粒物粒径、降水特性等密切相关，与王会霞等人[17]研究一致。

## 5　结论

不同天气条件下，植物叶表不同粒级单位面积颗粒物滞留能力存在差异，随着暴露时间的增长，差异更加明显。小雨(14mm)对颗粒物的冲刷能力有限，其中栾树 TSP 粒级颗粒物含量呈现不显著上升；中雨(29mm)可以冲刷掉 50.86%—66.03%TSP 颗粒物，其中栾树 $PM_{2.5}$ 冲刷率最低为 32.43%而银杏最高为 60.4%；室内模拟强降雨可以冲刷掉 93.94%—96.97%TSP 颗粒物，随着降雨增大，各粒径颗粒物随之冲刷量增加。叶表结构对抗冲刷能力有显著影响，革质叶片的大叶黄杨更容易滞尘及冲刷(TSP 滞尘量(1959.38±83.57) $mg/m^2$，小雨冲刷量可达到(775.06±33.99) $mg/m^2$)；具绒毛结构的叶表滞尘能力较低(如栾树)，同时抗冲刷能力较强；具条状叶表结构的银杏对细颗粒物($PM_{2.5}$)的抗冲刷能力最低(中雨 $PM_{2.5}$ 冲刷量(426.55±40.83.99) $mg/m^2$)。在降雨充足的环境中，易反复滞尘且容易冲刷的树种更具有去除空气中颗粒物的优势，如大叶黄杨、杜仲、五角枫；降雨不足环境中，大叶黄杨、银杏更具有反复滞留 $PM_{2.5}$ 的优势。建议北方城市森林绿化建设中栽植可反复滞尘的大叶黄杨和去除细颗粒物能力强的银杏。降雨不足的时候，亦可人工冲刷去除植物表面滞留颗粒

物,增大冲刷水强,有助于去除细颗粒物,从而再次滞尘。

**参考文献(References):**


[1] 周凯, 叶有华, 彭少麟, 粟娟. 城市大气总悬浮颗粒物与城市热岛. 生态环境, 2006, 15(2): 381-385.

[2] 陈茂直. 全球半数城市空气污染超标. 生态经济, 2014, 30(8): 6-9.

[3] 吕铃钥, 李洪远. 京津冀地区 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 污染的健康经济学评价. 南开大学学报: 自然科学版, 2016, 49(1): 69-77.

[4] 刘璐, 管东生, 陈永勤. 广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力. 生态学报, 2013, 33(8): 2604-2614.

[5] Liu L, Guan D S, Peart M R, Wang G, Zhang H, Li Z W. The dust retention capacities of urban vegetation—a case study of Guangzhou, South China. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(9): 6601-6610.

[6] Tallis M, Taylor G, Sinnett D, Freer-Smith P. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(2): 129-138.

[7] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. Urban Forestry & Urban Greening, 2006, 4(3/4): 115-123.

[8] Morani A, Nowak D J, Hirabayashi S, Calfapietra C. How to select the best tree planting locations to enhance air pollution removal in the MillionTreesNYC initiative. Environmental Pollution, 2011, 159(5): 1040-1047.

[9] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, Hoehn R. Modeled $PM_{2.5}$ removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. Environmental Pollution, 2013, 178: 395-402.

[10] Chen L X, Liu C M, Zou R, Yang M, Zhang Z Q. Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. Environmental Pollution, 2016, 208: 198-208.

[11] Hofman J, Wuyts K, Van Wittenberghe S, Samson R. On the temporal variation of leaf magnetic parameters: seasonal accumulation of leaf-deposited and leaf-encapsulated particles of a roadside tree crown. Science of the Total Environment, 2014, 493: 766-772.

[12] 柴一新, 祝宁, 韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1121-1126.

[13] 周杰良, 闫文德, 王建湘. 7 种盆栽观赏植物室内滞尘能力研究. 现代农业科技, 2009, (8): 7-8, 10-10.

[14] 俞学如. 南京市主要绿化树种叶面滞尘特征及其与叶面结构的关系[D]. 南京: 南京林业大学, 2008: 52-52.

[15] 殷杉, 蔡静萍, 陈丽萍, 申哲民, 邹晓东, 吴旦, 王文华. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益. 生态学报, 2007, 27(11): 4590-4595.

[16] Freer smith P H, Beckett K P, Taylor G. Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, Populus deltoides X trichocarpa 'Beaupre', Pinus nigra and X Cupressocyparis leylandii for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment[J]. Environmental Pollution, 2005, 133(1):157-167.

[17] 王会霞, 石辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化. 生态学报, 2015, 35(6): 1696-1705.

[18] Przybysz A, Sæbø A, Hanslin H M, Gawroński S W. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. Science of the Total Environment, 2014, 481: 360-369.

[19] 查燕. 气象因子对城市植物叶面颗粒物的影响研究. 安徽农业科学, 2015, 43(20): 246-248.

[20] 陈玮, 何兴元, 张粤, 孙雨, 王文菲, 宁祝华. 东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2113-2116.

[21] 郑少文, 邢国明, 李军, 李锦生. 北方常见绿化树种的滞尘效应. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 383-387.

[22] 王会霞. 基于润湿性的植物叶面截留降水和降尘的机制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.

[23] Chen L X, Liu C M, Zhang L, Zou R, Zhang Z Q. Variation in tree species ability to capture and retain airborne fine particulate matter ($PM_{2.5}$). Scientific Reports, 2017, 7(1): 3206.

[24] 王赞红, 李纪标. 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态. 生态环境, 2006, 15(2): 327-330.

[25] 贾彦, 吴超, 董春芳, 李常平, 廖慧敏. 7 种绿化植物滞尘的微观测定. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4547-4553.

[26] 百度百科. 北京. [2017-04-21]. https://baike.baidu.com/item/%E5%8C%97%E4%BA%AC/128981

[27] 北京市环境保护检测中心. 空气质量日报. [2017-04-21]. http://www.bjmemc.com.cn/

[28] 北京市海淀区水务局. 海淀区雨量查询. [2017-04-21]. http://hdsw.bjhd.gov.cn/zxfw/bmcxfw/hdqyqcx/

[29] 全国空气质量历史数据. 北京市空气质量历史数据. [2017-04-21]. http://beijingair.sinaapp.com/#messy

[30] 赵俊凤, 陈孝彦, 翟麟秀. 废水悬浮物测定中负值现象的研究. 石油与天然气化工, 2012, 41(5): 526-529.

[31] 杨佳, 王会霞, 谢滨泽, 石辉, 王彦辉. 北京 9 个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释. 环境科学研究, 2015, 28(3): 384-392.

[32] 王会霞, 石辉, 李秧秧. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3077-3082.

[33] 房瑶瑶, 王兵, 牛香. 4 树种叶片表面颗粒物洗脱特征与其微观形态的关系. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(8): 119-126.

[34] 盛后财, 蔡体久, 朱道光, 李华, 武秀娟. 原始红松林穿透雨和树干茎流养分特征研究. 水土保持学报, 2008, 22(5): 47-51.

[35] 于小军, 汪思龙, 邓仕坚, 张秀永. 亚热带常绿阔叶林和杉木人工林茎流与穿透雨的养分特征. 生态学杂志, 2003, 22(6): 7-11.